

dr inż. Anna Banas^{1)*}
 ORCID: 0000-0003-4760-4592
 inż. Dominika Kuryłowicz²⁾

Low-altitude photogrammetry for digital documentation of truss bridges

Fotogrametria niskopułapowa w dokumentacji cyfrowej mostów kratownicowych

DOI: 10.15199/33.2026.04.06

Abstract. Low-altitude photogrammetry for the digital documentation of truss bridges was evaluated using the Niestępowo railway viaduct as a case study. A global reconstruction was compared with local modeling of a truss joint based on a subset of images from the same UAV survey (Agisoft Metashape 2.1.2). The results show that the global model is sufficient for general geometric inventory (dimensional differences <2%), whereas the local model markedly improves the measurement accuracy of structural details (error reduction of 83 – 100%) while requiring a short processing time (<30 min).
Keywords: photogrammetry; digital twins; truss bridge; geometric surveying; fidelity of reconstruction.

Streszczenie. W artykule oceniono możliwości fotogrametrii niskopułapowej w dokumentacji mostów kratownicowych na przykładzie wiaduktu kolejowego w Niestępowie. Porównano rekonstrukcję globalną oraz modelowanie lokalne węzła bazujące na podzbiorze zdjęć z tej samej kampanii UAV (Agisoft Metashape 2.1.2). Wykazano, że model globalny jest wystarczający do inwentaryzacji ogólnej (różnica wymiarów <2%), natomiast model lokalny znacznie poprawia wymiarowanie detali (redukcja błędów 83 – 100%) przy krótkim czasie opracowania (<30 min).

Słowa kluczowe: fotogrametria; cyfrowe bliźniaki; most kratownicowy; inwentaryzacja geometryczna; dokładność rekonstrukcji.

Low-altitude photogrammetry using unmanned aerial vehicles (UAVs) has become a widely adopted method for documenting engineering structures, including historic bridges. Such structures often lack complete documentation, and access to them is frequently limited due to their large dimensions and their location over terrain obstacles or water bodies. Traditional direct measurements are time-consuming, which has stimulated the development of non-contact methods based on UAVs [1 ÷ 5].

The development of Structure-from-Motion (SfM) and Multi-View Stereo (MVS) techniques enables the generation of three-dimensional reconstructions from large image datasets acquired under field conditions [6 ÷ 14]. Photogrammetric methods support heritage inventory and structural diagnostics, facilitating both condition assessment and the planning of maintenance and repair works [8 ÷ 11]. Increasing attention is also being given to digital spatial models within the BIM framework, enabling the creation of digital twins of bridge structures used for infrastructure management throughout the entire lifecycle of the structure [12]. The literature also points to alternative non-contact measurement approaches, such as close-range photogrammetry supported by coded targets and scale references, as well as LiDAR laser scanning using UAV platforms. These methods can provide high measurement accuracy; however, their effectiveness depends on the geometric properties of the object, system parameters, and human factors [15, 16].

Fotogrametria niskiego pułapu z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych (BSP) staje się powszechną metodą dokumentacji obiektów inżynierskich, w tym mostów zabytkowych, które często nie mają kompletnej dokumentacji, a dostęp do konstrukcji bywa utrudniony ze względu na znaczne gabaryty obiektu oraz lokalizację nad przeszkodami terenowymi lub wodnymi. Tradycyjne pomiary bezpośrednie są czasochłonne, co motywuje rozwój metod bezkontaktowych bazujących na UAV [1 ÷ 5].

Rozwój technik Structure-from-Motion (SfM) oraz Multi-View Stereo (MVS) umożliwia tworzenie trójwymiarowej rekonstrukcji na podstawie dużych zbiorów zdjęć wykonywanych w warunkach terenowych [6 ÷ 14]. Metody fotogrametryczne wspierają inwentaryzację konserwatorską oraz diagnostykę konstrukcji, ułatwiając ocenę stanu technicznego, a także planowanie prac remontowych [8 ÷ 11]. Rosnące znaczenie zyskują cyfrowe modele przestrzenne w podejściu BIM, umożliwiające tworzenie cyfrowych bliźniaków obiektów mostowych wykorzystywanych w zarządzaniu infrastrukturą w całym cyklu życia konstrukcji [12]. W literaturze wskazuje się również na alternatywne podejścia do pomiarów bezkontaktowych, takie jak fotogrametria bliskiego zasięgu wspomagana znacznikami i wzorcami skali, a także skanowanie laserowe LiDAR z wykorzystaniem BSP. Metody te mogą zapewnić wysoką dokładność pomiarów, jednak ich skuteczność zależy od właściwości geometrycznych obiektu oraz parametrów systemu pomiarowego, a także od czynnika ludzkiego [15, 16].

W przypadku obiektów o złożonej geometrii, takich jak mosty kratownicowe, jednym z kluczowych wyzwań pozostaje uzyskanie odpowiedniej dokładności metrycznej modeli globalnych. Powtarzalność elementów, jednorodna kolorystyka powierzchni oraz

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska; Katedra Konstrukcji Inżynierskich; Centrum EkoTech

²⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

* Correspondence address: anna.banas@pg.edu.pl

In the case of structures with complex geometry, such as truss bridges, one of the key challenges remains achieving sufficient metric accuracy in global models. Repetitive structural elements, uniform surface appearance, and limited texture may lead to local reconstruction distortions and hinder the accurate representation of structural details [14]. This issue particularly affects models developed at the scale of the entire structure. One possible approach to improving geometric representation is the generation of local models based on a selected subset of images focused on structural details.

This paper presents an analysis of the effect of selecting image subsets from the same flight campaign on improving the accuracy of geometric representation and joint detail reconstruction in local models of a truss railway bridge in Niestępowo. The analysed structure was selected as a representative case of challenging reconstruction conditions resulting from repetitive geometry and uniform surface texture, allowing for an evaluation of the proposed method under unfavorable conditions. The results of the global reconstruction, described in [14], were compared with those obtained from local detail modelling. The analysis included the accuracy of selected geometric parameters as well as data processing time. The study was conducted using control points (CPs), ensuring proper model orientation and scaling. The obtained results indicate that the local approach can significantly enhance the applicability of UAV-based photogrammetry in the practical inventory and digital documentation of bridge structures.

Global model of the truss bridge

The global photogrammetric model of the analysed bridge was developed based on a complete UAV flight campaign (Figure 1) [14]. Image acquisition was carried out under field conditions and included both general views of the structure and oblique images enabling the reconstruction of spatial truss elements as well as the transverse beam system. UAV surveys were conducted using three platforms: DJI Phantom 4 Pro, DJI Mavic 2 Pro, and DJI Mini 3 Pro, which enabled the acquisition of images with varying geometric parameters and resolutions. The data were collected along flight paths parallel to the bridge axis as well as transverse trajectories, including nadir and oblique ($\sim 45^\circ$) views. Flights were performed at an altitude of approximately 30 m for overhead passes and 3 – 7 m for lateral passes, ensuring multi-directional coverage of the structure. The surveys were conducted under conditions ensuring sufficient image quality for photogrammetric reconstruction. Particular attention was paid to maintaining uniform lighting conditions, minimising the effects of shadows and reflections.

More than 11,000 photographs were used for the global reconstruction in Agisoft Metashape 2.1.2. Such a large dataset enabled reconstruction of the full geometry of the structure; however, it required automatic image filtering and the exclusion of low-quality images, resulting, among others, from variable lighting conditions and the repetitive nature of truss elements.

ograniczona tekstura mogą prowadzić do lokalnych deformacji rekonstrukcji oraz utrudniać wierne odwzorowanie detalu konstrukcyjnego [14]. Problem ten dotyczy przede wszystkim modeli opracowywanych w skali całego obiektu. Jednym z możliwych podejść wspomagających poprawę odwzorowania geometrii jest wykonanie modeli lokalnych na podstawie wybranego podzbioru zdjęć, ukierunkowanych na detale konstrukcyjne.

W artykule zaprezentowano analizę wpływu selekcji podzbioru zdjęć z tej samej kampanii nalotowej na poprawę dokładności odwzorowania wymiarów geometrycznych i detali węzłów kratownicy w modelach lokalnych kratownicowego mostu kolejowego w Niestępowie. Analizowany obiekt wybrano jako przykład konstrukcji o utrudnionych warunkach rekonstrukcji, wynikających z powtarzalnej geometrii oraz jednorodnej tekstury powierzchni, co pozwala na ocenę możliwości stosowania metody w warunkach niekorzystnych. Porównano wyniki rekonstrukcji globalnej, opisaną w [14] oraz lokalnego modelowania detalu. Analizie poddano dokładność odwzorowania wybranych parametrów geometrycznych oraz czas przetwarzania danych. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem punktów odniesienia (fotopunktów), zapewniających orientację i skalowanie modeli. Uzyskane rezultaty wskazują, że podejście lokalne może istotnie zwiększyć użyteczność fotogrametrii UAV w praktyce inwentaryzacji i cyfrowej dokumentacji obiektów mostowych.

Model globalny mostu kratownicowego

Globalny model fotogrametryczny analizowanego mostu opracowano na podstawie pełnej kampanii nalotowej wykonanej z użyciem UAV (fotografia 1) [14]. Rejestrację obrazów przeprowadzono w warunkach terenowych, obejmując ujęcie ogólne konstrukcji oraz zdjęcia pod kątem umożliwiającym odwzorowanie elementów przestrzennych kratownicy oraz układu poprzecznic. Naloty UAV wykonano z wykorzystaniem trzech platform: DJI Phantom 4 Pro; DJI Mavic 2 Pro oraz DJI Mini 3 Pro, co pozwoliło na pozyskanie obrazów o zróżnicowanych parametrach geometrycznych i rozdzielczości. Rejestrację prowadzono w układzie przelotów równoległych do osi mostu oraz przelotów poprzecznych, z ujęciami nadir i ukośnymi ($\sim 45^\circ$), przy wysokości ok. 30 m w przypadku przelotów górnych oraz 3 – 7 m – przelotów bocznych, co zapewniło wielokierunkowe pokrycie obiektu. Naloty UAV przeprowadzono w warunkach terenowych zapewniających możliwość pozyskania obrazów o odpowiedniej jakości do rekonstrukcji fotogrametrycznej. Dodatkowo dążono do uzyskania możliwie równomiernych warunków oświetleniowych, minimalizując wpływ cieni i refleksów na proces rekonstrukcji.

Do rekonstrukcji globalnej wykorzystano ponad 11 tys. fotografii w oprogramowaniu Agisoft Metashape 2.1.2. Tak duży zbiór danych pozwolił na odtworzenie pełnej geometrii obiektu, ale wymagał zastosowania automatycznej selekcji obrazów oraz ograniczenia liczby ujęć o słabej jakości, wynikających m.in. z warunków oświetleniowych, a także powtarzalności elementów kratowych.

Proces rekonstrukcji bazował na klasycznym podejściu Structure-from-Motion (SfM), obejmującym wyznaczenie

The reconstruction process was based on the classical Structure-from-Motion (SfM) workflow, including tie point extraction, camera alignment, and dense point cloud generation, forming the basis for subsequent mesh modelling. The resulting global model enabled representation of the entire load-bearing system, including the span geometry, bracing system, and supports. The reconstruction was further supported by a geodetic control network consisting of ground control points (CPs) with known coordinates, used for model georeferencing and scaling. A detailed description of the measurement procedure is provided in [14].

To assess the metric quality of the reconstruction, selected geometric parameters of the bridge were measured, including the theoretical span length, transverse beam spacing, and structural height. Comparison with available technical documentation showed good agreement, with relative differences not exceeding 2%. This confirms that **the global model can serve as a reliable tool for general geometric inventory of bridge structures, particularly in the case of structures with limited accessibility**. At the same time, it was observed that in areas with limited texture and high repetition of truss elements, local reconstruction inaccuracies occurred, which may be significant when analysing structural details (photo 2). In addition, the presence of repetitive elements increased processing time due to the need for manual corrections to ensure proper reconstruction. Therefore, the subsequent part of the study focuses on improving the representation of selected structural components by developing local models based on a selected subset of images. Photos 1 and 2 also indicate the area used for local model development.

punktów wiążących, orientację kamer oraz generację gęstej chmury punktów, stanowiącej podstawę dalszego modelowania siatkowego. Uzyskany model globalny umożliwił przedstawienie całego ustroju nośnego wraz z geometrią przęsła, elementów stężących oraz podpór. Proces rekonstrukcji został dodatkowo wsparty geodezyjną osnową pomiarową, obejmującą fotopunkty (CP) o znanych współrzędnych, wykorzystane do orientacji przestrzennej i skalowania modelu. Szczegółowy opis procedury pomiarowej przedstawiono w [14].

W celu oceny jakości metrycznej rekonstrukcji przeprowadzono pomiary wybranych wymiarów geometrycznych mostu, takich jak rozpiętość teoretyczna przęsła, rozstaw poprzecznic oraz wysokość konstrukcji. Porównanie wyników z dostępną dokumentacją techniczną wykazało dobrą zgodność, a względne różnice wymiarowe nie przekraczały 2%. Potwierdza to, że **model globalny może stanowić użyteczne narzędzie do ogólnej inwentaryzacji geometrycznej obiektów mostowych, szczególnie w przypadku konstrukcji trudno dostępnych**. Jednocześnie zauważono, że w obszarach o ograniczonej teksturze oraz dużej powtarzalności elementów kratownicy pojawiały się lokalne niedokładności rekonstrukcji, które mogą mieć znaczenie przy analizie detalu konstrukcyjnego (fotografia 2). Dodatkowo elementy bliźniacze konstrukcji wpływają na wydłużenie czasu wykonywania opracowania przez konieczność korekt manualnych, aby program mógł prawidłowo wykonać rekonstrukcję. W związku z tym w dalszej części pracy podjęto próbę poprawy odwzorowania wybranych fragmentów konstrukcji przez wykonanie modeli lokalnych na podstawie wyselekcjonowanego podzbioru zdjęć. Na fotografiach 1 i 2 zaznaczono również obszar wykorzystany do opracowania modelu lokalnego.

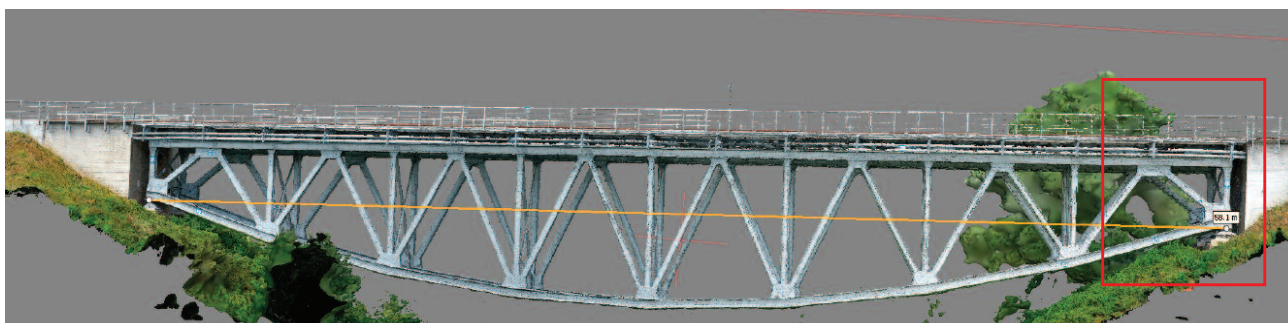


Photo 1. Global model of the truss bridge in Niestepowo, including an example measurement of the span length, with the local model fragment highlighted in red

Fot. 1. Model globalny mostu kratownicowego w Niestepowie wraz z przykładowym pomiarem rozpiętości przęsła z zaznaczonym na czerwono fragmentem modelu lokalnego



Photo 2. Segments of the truss in global model, with the portion corresponding to the local model highlighted in red

Fot. 2. Fragmenty kratownicy w modelu globalnym z zaznaczonym na czerwono fragmentem modelu lokalnego

Local model

As part of a detailed analysis of a selected fragment of the structure, a **local model of a single truss joint was developed** (Photo 3). The analysis focused on a support node together with adjacent segments of the bottom chords, vertical members, and diagonals. The objective was to achieve the highest possible accuracy in representing the geometry and dimensions of the local truss components. The model was developed in Agisoft Metashape 2.1.2 based on the same dataset used for the global model described in [14], but using only 69 selected photographs. Image selection was carried out based on the analysis of camera orientations and their spatial distribution within the global model, enabling rapid identification of images covering the analysed structural fragment. The selection was guided by the clarity of joint geometry, including images acquired from multiple viewing angles, ensuring complete visual coverage of all relevant details, such as gusset plates, rivets, and cross-sectional dimensions of structural elements.



Photo 3. Selected parts of the truss in the local model

Fot. 3. Fragmenty kratownicy w modelu lokalnym

The local reconstruction process was based on the same ground control points (CPs) used in the global model [14]. However, for the purposes of the node model, only three points – labelled 21, 22, and 30 – were used, as their locations provided favourable geometric conditions for model scaling and spatial referencing (point numbering consistent with [14]). As in the global model, the reconstruction was performed using the Structure-from-Motion (SfM) workflow, enabling the generation of a dense point cloud followed by a high-resolution mesh model. Limiting the dataset to images of a single node eliminated issues related to the high repetition of elements observed in the global model, which had negatively affected reconstruction time [14]. As a result, the local model complements the inventory process by enabling a more accurate assessment of the technical condition of a key structural component. It also allows for higher metric accuracy in selected elements. It should also be noted that reconstructing a specific structural fragment significantly reduces model generation time, enabling faster data processing.

However, the visual quality of the local model is noticeably lower than that of the global model. This is due to the fact that only a subset of images from the full dataset is processed. Photogrammetric software performs more effectively when processing complete image blocks from a single acquisition session, which form stereo pairs, rather than selected subsets, as in the analysed case. Increasing

Model lokalny

W ramach szczegółowej analizy wybranego fragmentu konstrukcji opracowano **model lokalny pojedynczego węzła kratownicy** (fotografia 3). Analiza została ograniczona do węzła podporowego wraz z przylegającymi fragmentami pasów dolnych, słupków oraz krzyżulców. Celem było możliwie najdokładniejsze odwzorowanie wymiarów i geometrii lokalnych elementów kratownicy. Model ten powstał w oprogramowaniu Agisoft Metashape 2.1.2 na podstawie tych samych zdjęć, które posłużyły do budowy globalnego modelu mostu opisanego w pracy [14], ale z wykorzystaniem jedynie 69 wyselekcjonowanych fotografii. Selekcja zdjęć została przeprowadzona na podstawie analizy orientacji kamer i ich rozmieszczenia w modelu globalnym, co umożliwiło szybką identyfikację ujęć obejmujących analizowany fragment konstrukcji. Wyboru dokonano, kierując się kryterium czytelności geometrii węzła, obejmując zdjęcia wykonane z różnych kątów, co zapewniło pełną wizualizację wszystkich szczegółowych elementów konstrukcji, takich jak blachy węzłowe, nity oraz wymiary przekrojów elementów.

Proces rekonstrukcji lokalnej bazował na tych samych fotopunktach (CP), które wykorzystano w opracowaniu globalnym [14]. Na potrzeby modelu węzła ograniczono się jednak do trzech punktów oznaczonych numerami 21, 22 i 30, których lokalizacja zapewniała najkorzystniejsze uwarunkowanie geometryczne do skalowania i orientacji modelu w przestrzeni (numery fotopunktów zgodne z opracowaniem [14]). Analogicznie do modelu globalnego, rekonstrukcję przeprowadzono z wykorzystaniem metody Structure-from-Motion (SfM), co pozwoliło na wygenerowanie gęstej chmury punktów, a następnie modelu siatkowego o wysokim stopniu szczegółowości. Ograniczenie zbioru zdjęć do ujęć jednego węzła wyeliminowało problemy związane z dużą powtarzalnością elementów, które występowały w modelu globalnym i wpływały na czas rekonstrukcji [14]. Dzięki temu model lokalny stanowi uzupełnienie inwentaryzacji, umożliwiając ocenę stanu technicznego kluczowego fragmentu konstrukcji, z większą dokładnością metryczną wybranych elementów. Warto również zauważyć, że przy rekonstrukcji konkretnego fragmentu konstrukcji znacznie skraca się czas produkcji modelu, a tym samym istnieje możliwość uzyskania wyników w krótszym czasie.

W modelu lokalnym jakość wizualna odwzorowania jest znacznie gorsza niż w modelu globalnym. Problem wynika z faktu, że do programu wczytywane są jedynie wybrane zdjęcia z całej puli wykonanych fotografii. Programy fotogrametryczne działają znacznie efektywniej, gdy przetwarzany jest

the number of images could improve the visual quality of the local model; however, this would significantly increase computation time without a corresponding improvement in metric accuracy. The adopted approach, on the other hand, enabled a substantial reduction in processing time while maintaining the required dimensional accuracy – and, in some cases, even improving it.

Comparison of results

To assess the applicability of the local modelling approach, a comparative analysis was conducted, considering both computational efficiency and the metric accuracy of the reconstruction. The comparison included data processing time and the accuracy of selected geometric parameters obtained from the global and local models.

Data processing in Agisoft Metashape 2.1.2 reveals a clear contrast between the two models in terms of computational demand. The global model was developed based on 11,212 images, resulting in a highly complex mesh (332,767,156 faces and 166,622,035 vertices) and a total processing time of approximately 95 hours. In contrast, the local model, generated from a reduced dataset of 69 images, exhibited a reduction in mesh complexity of over two orders of magnitude (2,903,584 faces), with a processing time of approximately 20 – 25 minutes. Image selection did not require manual inspection of the entire dataset but was based on the analysis of camera orientations in the global model. Preparation of the 69-image subset took approximately 60 minutes – longer than the processing time of the local model itself – yet still negligible compared to the time required for the global model. This difference results not only from the reduction in the number of images (11,212 vs. 69), but also likely from the mitigation of issues related to repetitive geometry and reconstruction complexity at the scale of the entire structure. This demonstrates that the local modelling approach significantly reduces the time required to obtain results without compromising the metric reliability of the analysed structural fragment.

Selected geometric parameters obtained from both models are presented in Table. Each analysed dimension was measured ten times in evenly distributed cross-sections of the examined element (e.g. along the length of a truss member), and the representative value was taken as the arithmetic mean. The variability of the results was quantified using the standard deviation (SD). The comparison indicates that generating a local model from the same dataset significantly improves the accuracy of structural detail measurements compared to the global model, particularly for elements with geometry that is less favourable for interpretation at the scale of the entire structure. In the global model, the largest deviations were observed for parameters associated with elements oriented perpendicular to the dominant viewing direction (e.g. the height of vertical members and diagonals), which results from limited visibility of cross-sections and local matching effects in repetitive geometry. The application of local modelling significantly reduced these effects. For

cały blok zdjęć z jednej sesji, które tworzą stereopary, a nie jak w analizowanym przypadku, wyłącznie wybrane fragmenty. Możliwe byłoby zwiększenie liczby wykorzystanych zdjęć w celu poprawy jakości wizualnej modelu lokalnego, jednak wiązałoby się to ze znacznym wydłużeniem czasu obliczeń, bez istotnej poprawy parametrów metrycznych. Zastosowane podejście pozwoliło natomiast na znaczne skrócenie czasu przetwarzania danych z zachowaniem wymaganej precyzji wymiarowania, a w przypadku wybranych detali nawet zwiększonej.

Porównanie wyników

W celu oceny zasadności stosowania modelu lokalnego przeprowadzono analizę porównawczą obejmującą zarówno efektywność obliczeniową, jak i dokładność metryczną rekonstrukcji. Porównaniu poddano czas przetwarzania danych oraz dokładność odwzorowania wybranych parametrów geometrycznych uzyskanych z modelu globalnego i lokalnego.

Przetwarzanie danych w Agisoft Metashape 2.1.2 pokazuje wyraźny kontrast pomiędzy modelami pod względem nakładów obliczeniowych. Model globalny opracowano na podstawie 11 212 zdjęć, co przełożyło się na bardzo dużą złożoność końcowej siatki (332 767 156 trójkątów, 166 622 035 wierzchołków) oraz całkowity czas przetwarzania wynoszący ok. 95 h. Dla porównania model lokalny, wykonany z ograniczonego zbioru 69 zdjęć, został wygenerowany przy ponad dwurzędowym zmniejszeniu złożoności siatki (2 903 584 trójkąty), a czas jego przetwarzania wyniósł ok. 20 – 25 min. Selekcja zdjęć nie wymagała ręcznego przeglądu całego zbioru, lecz bazowała na analizie orientacji kamer w modelu globalnym. Czas przygotowania zestawu 69 fotografii wyniósł ok. 60 min, a więc był dłuższy niż samo przetwarzanie modelu lokalnego, jednak pozostawał pomijalny w porównaniu z czasem opracowania modelu globalnego. Różnica ta wynikała nie tylko ze zmniejszenia liczby zdjęć (11 212 vs 69), lecz prawdopodobnie także z ograniczenia problemów związanych z powtarzalnością geometrii i złożonością rekonstrukcji w skali całego obiektu. Oznacza to, że model lokalny pozwala znacznie skrócić czas uzyskania wyników bez utraty przydatności metrycznej analizowanego fragmentu konstrukcji.

W tabeli zestawiono wybrane parametry geometryczne uzyskane z modelu globalnego oraz lokalnego. Każdy z analizowanych wymiarów odczytywano dziesięciokrotnie w równomiernie rozmieszczonych przekrojach badanego elementu (np. wzdłuż długości pręta kratownicy), a jako wartość reprezentatywną przyjęto średnią arytmetyczną z pomiarów. Zmienność wyników określono za pomocą odchylenia standardowego (SD). Zestawienie w tabeli pokazuje, że wykonanie modelu lokalnego z tego samego zbioru danych pozwala istotnie poprawić wymiarowanie detali konstrukcyjnych w porównaniu z modelem globalnym, szczególnie w przypadku elementów o geometrii mniej korzystnej do odczytu w skali całego obiektu. W modelu globalnym największe odchylenia dotyczyły parametrów związanych z elementami prostopadłymi do dominującego kierunku obserwacji (np. wysokość słupka i krzyżulca), co wynika z ograniczonej widoczności przekrojów poprzecznych i lokalnych efek-

Comparison of selected geometric parameters obtained from global and local models

Porównanie wybranych parametrów geometrycznych uzyskanych z modelu globalnego i lokalnego

Geometric parameter/ Parametr geometryczny	Reference value/Wartość referencyjna	Global model/Model globalny		Local model/Model lokalny		Error reduction [%]/Redukcja błędu [%]
		mean value \pm SD/ wartość średnia \pm SD	error [%]/ błąd [%]	mean value \pm SD/ wartość średnia \pm SD	error [%]/ błąd [%]	
Span length/Rozpiętość przęsła [m]	58,00	58,10 \pm 0,02	0,17	–	–	–
Spacing of cross beams [m]/ Rozstaw poprzecznic [m]	3,625	3,63 \pm 0,04	0,14	3,63 \pm 0,02	0,14	0,00
Length of vertical member [m]/ Długość słupka [m]	3,062	3,05 \pm 0,01	-0,39	3,06 \pm 0,01	-0,07	83,33
Height of vertical post [mm]/ Wysokość słupka [mm]	324	309 \pm 2,12	-4,63	322 \pm 0,02	-0,62	86,67
Height of vertical member [mm]/ Szerokość półki słupka [mm]	315	298 \pm 3,02	-5,40	312 \pm 2,16	-0,95	90,00
Height of bottom chord [mm]/ Wysokość pasa dolnego [mm]	450	455 \pm 2,01	1,11	454 \pm 1,07	0,89	20,00
Width of bottom chord [mm]/ Szerokość pasa dolnego [mm]	610	573 \pm 3,63	-6,07	611 \pm 1,78	0,16	97,30
Height of diagonal member [mm]/ Wysokość krzyżulca [mm]	324	310 \pm 3,01	-4,32	325 \pm 0,54	0,31	92,86
Flange width of diagonal member [mm]/ Szerokość półki krzyżulca [mm]	310	309 \pm 0,98	-0,32	310 \pm 0,28	0,00	100,00

most analysed details, an error reduction in the range of 83–97% was observed (e.g. vertical member height: 86.67%, bottom chord width: 97.30%), while for the width of the diagonal flange, zero error was obtained (100% reduction). At the same time, for parameters of a more global nature, such as the spacing of transverse beams, both models produced comparable results, confirming their adequacy for general structural inventory.

Conclusions

Low-altitude photogrammetry enables the development of a global model of a truss bridge with good dimensional accuracy at the scale of the entire structure, making it suitable for general geometric inventory. However, in the case of truss structures characterised by uniform texture and repetitive geometry, global models may exhibit limitations in the representation of fine details. These limitations are particularly evident for elements with unfavourable orientation relative to the dominant viewing direction, as well as for parameters associated with cross-sections and joint geometry. The development of a local model of a truss node, based on a selected subset of images from the same UAV flight campaign, significantly improved the accuracy of dimensional measurements of structural details. For most analysed parameters, an error reduction in the range of 83 – 100% was achieved, while simultaneously reducing computation time (11,212 vs. 69 images; <30 min) and

tów dopasowania w powtarzalnej geometrii. Zastosowanie modelowania lokalnego istotnie ograniczyło te problemy. W przypadku większości analizowanych detali odnotowano redukcję błędu rzędu 83 – 97% (np. wysokość słupka 86,67%, szerokość pasa dolnego 97,30%), a w przypadku szerokości półki krzyżulca uzyskano błąd równy 0% (100% redukcji). Jednocześnie, w przypadku parametrów o charakterze globalnym, takich jak rozstaw poprzecznic, oba modele dały porównywalne wyniki, co potwierdza ich wystarczalność na poziomie inwentaryzacji ogólnej.

Wnioski

Fotogrametria niskopułapowa umożliwia wykonanie modelu globalnego mostu kratownicowego o dobrej zgodności wymiarowej w skali obiektu, przydatnego do ogólnej inwentaryzacji geometrycznej konstrukcji. Jednocześnie w przypadku kratownic o jednorodnej teksturze i powtarzalnej geometrii model globalny może wykazywać ograniczenia w odwzorowaniu detalu, szczególnie w przypadku elementów o orientacji mniej korzystnej względem dominującego kierunku obserwacji oraz wymiarów związanych z przekrojami poprzecznymi i węzłami. Wykonanie modelu lokalnego węzła, na podstawie wyselekcjonowanego podzbioru zdjęć z tej samej kampanii nalotowej, pozwoliło istotnie zwiększyć dokładność wymiarowania detali. W przypadku większości analizowanych parametrów uzyskano redukcję błędu rzędu 83 – 100%, przy jednoczesnym skróceniu czasu obliczeń

significantly decreasing mesh complexity (approximately 332 million vs. 2.9 million faces). **The global model provides superior visual quality due to the use of the complete image dataset, whereas the local model serves as a fast and precise tool for the assessment of selected structural components. An additional advantage of the local approach is the increased efficiency of data processing and analysis, resulting from reduced model complexity, which facilitates model verification and interpretation. The local model does not replace the global reconstruction but rather complements it in areas requiring high geometric accuracy.** Consequently, a two-stage approach is recommended, in which the global model serves as the basis for overall documentation and spatial referencing of the structure, while local models are developed for areas requiring refined dimensional assessment, detailed geometric analysis, or rapid evaluation of specific structural components.

The present study did not include a formal economic analysis of different image selection strategies. Future work will focus on the automation of the image selection process and the optimisation of the number of images required for the reconstruction of selected structural elements.

Financial support obtained for these studies from Gdansk University of Technology by the DEC-9/2022/IDUB/III.4.3/Pu grant under the Plutonium – ‘Excellence Initiative – Research University’ program is gratefully acknowledged [AB2].

Received: 29.12.2025
Revised: 29.01.2026
Published: 22.04.2026

(11 212 vs 69 zdjęć; <30 min) i znacznym zmniejszeniu złożoności siatki (ok. 332 mln vs 2,9 mln trójkątów). **Model globalny zapewnia lepszą jakość wizualną rekonstrukcji dzięki przetwarzaniu pełnego zbioru zdjęć, natomiast model lokalny stanowi szybkie i precyzyjne narzędzie do oceny wybranych fragmentów. Dodatkową zaletą podejścia lokalnego jest większa efektywność pracy na etapie analizy i obróbki danych, wynikająca z mniejszej złożoności modeli, co umożliwi ich sprawniejszą weryfikację i interpretację. Model lokalny nie zastępuje rekonstrukcji globalnej, lecz stanowi jej celowane uzupełnienie w strefach wymagających dużej dokładności odwzorowania.** W konsekwencji rekomendowane jest podejście dwuetapowe, w którym model globalny stanowi podstawę dokumentacji i orientacji obiektu, natomiast modele lokalne są wykonywane w przypadku stref wymagających doprecyzowania wymiarów lub szczegółowej oceny geometrii detalu, a także szybkiej oceny fragmentu konstrukcji.

Praca nie obejmowała formalnej analizy ekonomicznej różnych strategii selekcji zdjęć. W dalszych badaniach planuje się analizę metod automatyzacji procesu selekcji oraz optymalizacji liczby fotografii niezbędnych do rekonstrukcji wybranych fragmentów konstrukcji.

Badania zostały sfinansowane ze środków Politechniki Gdańskiej w ramach grantu DEC-9/2022/IDUB/III.4.3/Pu, realizowanego w programie „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” (Plutonium).

Artykuł wpłynął do redakcji: 29.12.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 29.01.2026 r.
Opublikowano: 22.04.2026 r.

Literature

- [1] Dorafshan S, Maguire M. Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation. *J Civ Struct Health Monit.* 2018; <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0285-4>.
- [2] Morgenthal G, Hallermann N, Kersten J, et al. Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges. *Autom Constr.* 2019; <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.006>.
- [3] Mohammadi M, Rashidi M, Mousavi V, Karami A, Yu Y, Samali B. Quality evaluation of digital twins generated based on UAV photogrammetry and TLS: Bridge case study. *Remote Sens.* 2021; <https://doi.org/10.3390/rs13173499>.
- [4] Seo J, Duque L, Wacker J. Glued-laminated timber arch bridge inspection using UAV. In: *Comput Civ Eng 2019: Smart Cities, Sustainability, and Resilience.* Reston; 2019. pp. 336–342.
- [5] Toriumi FY, Bittencourt TN, Futai MM. UAV-based inspection of bridge and tunnel structures: an application review. *Rev Ibracon Estrut Mater.* 2023; <https://doi.org/10.1590/s1983-41952023000100003>.
- [6] Geyik M, Tari U, Özcan O, Sunal G, Yaltrak C. A new technique mapping submerged beachrocks using low-altitude UAV photogrammetry, the Altınova region, northern coast of the Sea of Marmara (NW Türkiye). *Quat Int.* 2024; <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2024.10.011>.
- [7] Wang Q, Fang N, Zeng Y, Yuan C, Dai W, Fan R, Chang H. Optimizing UAV-SfM photogrammetry for efficient monitoring of gully erosion in high-relief terrains. *Measurement.* 2025; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118154>.
- [8] Kersten TP, Lindstaedt M. Image-based low-cost systems for automatic 3D recording and modelling of archaeological finds and objects. In: Ioannides M, Fritsch D, Leissner J, Davies R, Remondino F, Caffo R, editors. *Progress in Cul-*

- tural Heritage Preservation. Lecture Notes in Computer Science.* Vol. 7616. Berlin, Heidelberg: Springer; 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_1.
- [9] Tommasi C, Achille C, Fassi F. From point cloud to BIM: A modelling challenge in the cultural heritage field. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci.* 2016; 41: 429 – 436.
- [10] Banaś A, Niedostatkiwicz M. Zabezpieczenie detalu architektonicznego obiektu zabytkowego z zastosowaniem fotogrametrii. Część I. *Przegląd Budowlany.* 2025; <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.0990>.
- [11] Banaś A, Niedostatkiwicz M. Zabezpieczenie detalu architektonicznego obiektu zabytkowego z zastosowaniem fotogrametrii. Część II. *Przegląd Budowlany.* 2025; <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.1436>.
- [12] Mousavi V, Rashidi M, Mohammadi M, Samali B. Evolution of digital twin frameworks in bridge management: Review and future directions. *Remote Sens.* 2024; <https://doi.org/10.3390/rs16111887>.
- [13] Yiit AY, Uysal M. Virtual reality visualisation of automatic crack detection for bridge inspection from 3D digital twin generated by UAV photogrammetry. *Measurement.* 2025; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115931>.
- [14] Ciborowski T, Książkowski D, Kuryłowicz D, Nowak H, Ročlawski P, Stalmach P, Wałdowski P, Banaś A, Makowska-Jarosik K. Low-altitude photogrammetry and 3D modeling for engineering heritage: A case study on the digital documentation of a historic steel truss viaduct. *Appl Sci.* 2025; <https://doi.org/10.3390/app152312491>.
- [15] Borowski Ł, Pieńko M, Wielgos P. Evaluation of Inventory Surveying of Façade Scaffolding Conducted During ORKWIZ Project, in 2017 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics). 2017. DOI: 10.1109/BGC. Geomatics. 2017.31.
- [16] Lenda G, Marmol U, Borowiec N, Uznański A. Analysis of geometric and radiometric factors affecting measurement results of civil engineering structures with different scanning drone types. *Measurement.* 2026. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.119503.